LUCRARE LABORATOR NR.1

CARACTERIZAREA STATICĂ ȘI DINAMICĂ A ELASTOMERILOR PDMS-SiO_2-TiO_2

1. **Scopul lucrarii:**

- luarea la cunoştinţă a tehnicilor de experimentale pentru determinarea deformațiilor induse electric într-un film polimeric;
- descrierea echipamentului și metodei de măsurare care utilizează senzorul de deplasare MTN/EP080, produs de firma Monitran;
- utilizarea echipamentului de către studenți.

2. Introducere

În general, tehnicile experimentale pentru determinarea deformațiilor induse electric într-un film polimeric pot fi grupate în două categorii: metode de contact și metode non-contact. Metodele de contact, cum este aceea care folosește modificarea capacității între două plăci paralele pentru a măsura deplasarea, sunt dificil de utilizat, introduc erori și impun anumite constrângeri mecanice care pot fi semnificative pentru o probă subțire și moale. Câteva din metodele non-contact dezvoltate și adaptate pentru a măsura deformațiile polimerilor electroactivi sunt interferometrul optic cu laser, vibrometru laser Doppler, traductor de deplasare cu efect Hall, traductor cu reluctanță diferențial variabilă – DVRT și altele.

Caracterizarea statică se referă la determinarea răspunsului electromecanic de actuație al elastomerului dielectric atunci când acesta este plasat în câmp electric continuu, iar caracterizarea dinamică presupune investigarea deformației la stimularea cu tensiuni electrice alternative. Răspunsul electromecanic în regim dinamic este mai dificil de măsurat deoarece anumiți parametri de material, cum sunt constanta dielectrică şi modulul de elasticitate, variază mult cu frecvența semnalului aplicat.

Această lucrare este dedicată studiului comportamentului electromecanic al elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2 atunci când sunt stimulați cu tensiuni electrice continue .

3. Caracterizarea statică a elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2

3.1 Descrierea echipamentului

Metoda constă în plasarea unor filme circulare între doi electrozi metalici de alamă și măsurarea printr-o tehnică non-contact a contracțiilor filmelor (s_z) rezultate în urma aplicării între cei doi electrozi a unor tensiuni electrice continue înalte (de ordinul kV). Figura 1 ilustrează montajul experimental folosit în măsurări.

Senzorul de deplasare MTN/EP080 utilizat în cadrul măsurărilor este produs de firma Monitran şi măsoară deplasarea unui corp ţintă conductor, prin intermediul curenţilor turbionari (curenţi Foucault). Astfel, semnalul de înaltă frecvenţă (1 MHz) produs de modulul ECPD (Eddy Current Probe Driver) alimentează bobina de cupru din vârful senzorului care va radia în formă de con acest semnal. Într-un obiect ţintă plasat în apropierea senzorului se vor induce curenţi turbionari. Modulul ECPD demodulează acest semnal dând o tensiune modulată în care componenta continuă este direct proporţională cu distanţa dintre senzor şi obiectul ţintă iar componenta alternativă este direct proporţională cu vibraţia.



Figura 1 *Montajul experimental pentru măsurări în regim static*

Figura 2 ilustrează principiul de funcţionare al senzorului de deplasare cu curenţi turbionari folosit în măsurări.

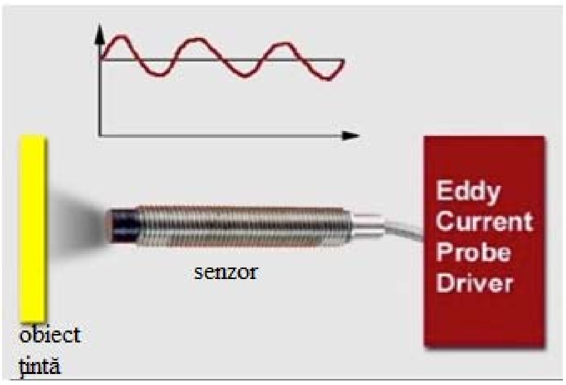


Figura 2 *Principiul de funcţionare al senzorului cu curenţi turbionari*

Spre deosebire de senzorul capacitiv, senzorul cu curenţi turbionari nu este influenţat de anumiţi contaminanţi (de exemplu ulei, apă, ş.a.) care se pot interpune între senzor şi corpul ţintă. Astfel, senzorul cu curenţi turbionari este potrivit pentru toate mediile, de la interiorul motoarelor cu ardere internă la camere controlate cu

semiconductori. În medii cu temperatură ridicată, senzorul cu curenți turbionari, independent de partea electronică (cu excepția cablului), poate rezista la temperaturi mai ridicate decât senzorul cu laser, care are partea electronică integrată în capul de detecție. De asemenea, vaporii sau fluidele pot condensa pe părțile optice ale senzorului laser şi îi pot degrada performanța în timp. Acestea nu se întâmplă în cazul senzorului cu curenți turbionari.

Curenții turbionari induşi în obiectul țintă depind de permitivitatea şi rezistivitatea materialului, dar și de grosimea acestuia. Cu cât materialul este mai conductiv, cu atât este mai bun ca obiect țintă. Poate exista o diferență drastică între materialele magnetice (fier, oțel) şi cele nemagnetice (aluminiu, cupru). Mai puțin drastică, dar tot semnificativă, este diferența între două materiale nemagnetice. Atunci când se comandă un astfel de senzor trebuie specificat materialul din care este alcătuit obiectul țintă, pentru a asigura o calibrare corectă. Obiectul țintă nu trebuie legat la masă şi trebuie să aibă o suprafață cât mai plană.

Forma și dimensiunile geometrice ale senzorului EP080 și modulului de alimentare EPCD sunt prezentate în figura 3. Modulul ECPD conține un oscilator de înaltă frecvență care alimentează senzorul. Circuitele de redresare şi liniarizare din ECPD convertesc tensiunea oscilatorie de la senzor în tensiune continuă proporțională cu distanța dintre vârful senzorului şi obiectul țintă. Modulul ECPD este alimentat cu o tensiune de +24 V de la o sursă de tensiune continuă. Tensiunea continuă de ieşire din ECPD poate fi folosită pentru poziționarea senzorului la distanța dorită față de obiectul țintă. Când ținta este în mişcare, forma semnalului alternativ suprapus peste tensiunea continuă a golului dintre senzor şi țintă indică amplitudinea vibrației.

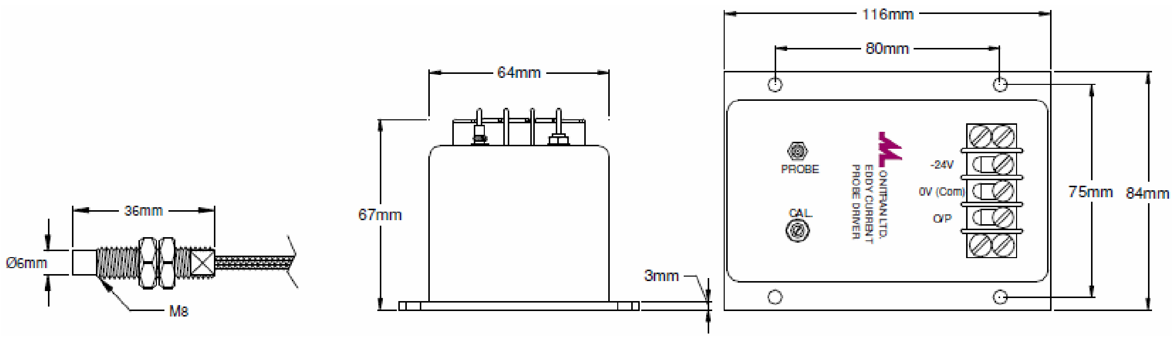


Figura 3 *Senzorul EP080 şi modulul de alimentare ECPD*

Pe modulul ECPD se găseşte un potențiometru de calibrare care permite ajustări foarte fine a ieşirii modulului pentru a compensa diferențele minore în ceea ce priveşte materialul țintă. Acest potențiometru trebuie folosit atunci când tensiunea de ieşire nu este mai mare de ±1% din valoarea tensiunii la exact jumătatea domeniului. Tensiunea de ieşire a modulului poate fi ajustată fără a afecta grav liniaritatea senzorului. Dacă eroarea din tensiunea de ieşire este mai mare de ±1% şi este inacceptabilă, este necesară recalibrarea senzorului şi modulului prin resetarea potențiometrelor interne *zero*, *gain* şi *linearity*.

Caracteristicile tehnice ale senzorului MTN/EP080 şi modulului ECPD sunt prezentate în tabelul 1.

***Tabelul 1** Caracteristicile tehnice ale senzorului MTN/EP080*

Alimentare ECPD	+24 V_{cc}, 30 mA
Sensibilitate senzor	8 V/mm nominal
Impedanţă de ieşire	< 50 Ω
Domeniul liniar	0,1 ÷ 2 mm
Liniaritate	1 % nominal
Domeniul de frecvenţă	DC ÷ 10 kHz
Temperatura de funcţionare	Senzor: - 30°C ÷ 180°C ECPD: -20°C ÷ 80°C
Sensibilitatea la temperatură	Senzor: mai puţin de 5% la 150°C ECPD: mai puţin de 5% la 80°C
Materialul carcasei	Oţel inoxidabil
Cablul	RG179 PTFE izolat
Lungimea maximă a cablului	9 metri
Cablu prelungitor	MTN/EXTOECP
Material de calibrare	Oţel AISI 4140

Senzorul EP080 a venit din fabrică calibrat pentru un obiect ţintă din oţel cu conţinut scăzut de carbon (ANSI 4140), material utilizat în arbori de pompe şi turbine. Calibrarea unui sistem de măsurare a deplasării verifică faptul că ieşirea sistemului corespunde cu o deplasare fizică cunoscută. Calibrarea necesită abilitatea de a poziţiona un obiect ţintă la o anumită distanţă în raport cu domeniul senzorului. Obiectele ţintă din materiale nemagnetice, cum este aluminiul şi cuprul, vor prezenta liniaritate doar pentru 50% din domeniul standard al calibrării cu oţel. Înainte de a realiza măsurătorile în regim static, s-a făcut o calibrare a senzorului pentru un obiect ţintă din alamă, cu diametrul de 18 mm şi grosimea de 0,34 mm.

Montarea senzorului cu curenţi turbionari are anumite reguli, dacă acesta este sau nu ecranat. Senzorul EP080 nu este ecranat şi trebuie montat astfel încât să se minimizeze efectul rugozităţii suprafeţei, modificărilor de diametru sau excentricitate, care vor afecta precizia măsurătorii. Prin urmare, este indicat ca obiectul ţintă să fie perpendicular pe senzor, să aibă o suprafaţă de aproximativ 3 ori mai mare decât diametrul senzorului, fără discontinuităţi sau canale care să intre în contact cu sonda, să fie plasat faţă de vârful senzorului la o distanţă egală cu aproximativ 10 – 20% din domeniul total al scării de măsurare (în cazul senzorului EP080 la mijlocul domeniului de măsurare, la 1 mm), deoarece aici se obţine cea mai bună liniaritate), iar în imediata apropiere a sondei să nu se găsească obiecte metalice. Figura 4 ilustrează detaliile poziţionării senzorului de deplasare cu curenţi turbionari.

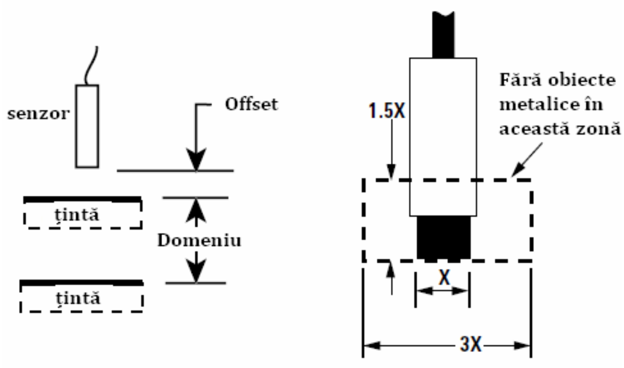


Figura 4 *Poziționarea senzorului de deplasare cu curenți turbionari neecranat*

Distanța dintre sondă şi obiectul țintă se calculează după o formulă simplă: d (mm)=V_{dc}/sensibilitatea senzorului (8 V/mm), unde V_{dc} este tensiunea de la bornele modulului ECPD. Pentru vibrații sinusoidale, deplasarea vârf la vârf poate fi calculată din tensiunea de ieşire măsurată folosind un instrument de măsură care indică valoarea RMS reală, după cum urmează: $d_{vârf-vârf}$=2,83 V_{rms}/sensibilitatea senzorului (8 V/mm).

În lanțul de măsură a fost introdusă placa de achiziție MicroBox produsă de Disynet (http://www.microbox.net), care are rolul de a prelua semnalul (tensiunea continuă analogică) de la ieşirea modulului ECPD şi de a-l transmite la calculator, unde este vizualizat, înregistrat şi prelucrat cu ajutorul soft-ului Senzor2USB aferent plăcii de achiziție. Figura 5 prezintă placa de achiziție (26 pini) şi conectorul terminal (25 pini) necesare pentru conectarea senzorului la calculator. Cele două componente sunt conectate între ele printr-un cablu adaptor care are la un capăt o mufă cu 25 de pini iar la celălalt capăt una cu 26 de pini. Placa de achiziție are următoarele caracteristici tehnice: 5 intrări analogice (10 mV la 10 V), o intrare digitală şi un numărător, 5 ieşiri digitale, o ieşire analogică, parte de excitație integrată (de exemplu pentru celulele de încărcare), amplificare integrată pentru 3 canale, conexiune USB de tip „plug and play”, rezoluție de până la 21 biți, până la 25 kHz rată de transfer pe canal. De asemenea, placa de achiziție poate fi conectată şi la programul de achiziție şi prelucrare de semnale LabVIEW. În tabelul 2 sunt prezentate corespondențele între pinii plăcii de achiziție şi cei ai conectorul terminal.

Figura 6 ilustrează sursa de tensiune/curent continuă BK Precision Model 1673 cu trei ieșiri, două variabile (0-32 V_{dc}/0-6 A) și una fixă (5 V_{dc}/3A), care a alimentat senzorul de deplasare și sursa Trek 610E de înaltă tensiune folosită pentru stimularea în regim static a probelor de elastomeri PDMS-SiO_2-TiO_2, cu un domeniu de la 0 la ±10 kV. Aceasta din urmă poate funcționa și ca sursă de curent (0 la ±2000 μA), amplificator sau controller, atât în curent continuu cât și alternativ.

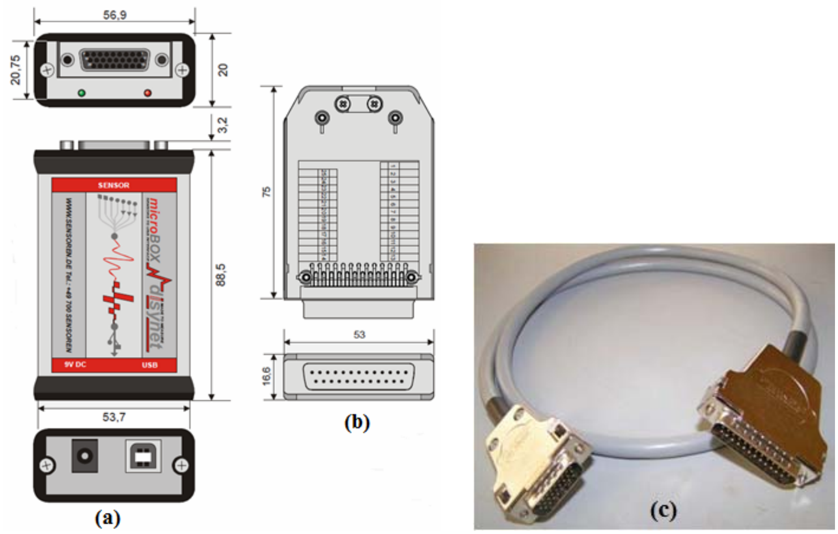


Figura 5 *(a) Placa de achiziție; (b) conector terminal; (c) cablu adaptor*

Tabelul 2 *Corespondența pinilor plăcii de achiziție și conectorului terminal*

Placă de achiziție 26 pini	**Conector terminal** 25 pini	**Semnificație**
Pin 2	Pin 1	+ 12 V (sau + 15 V)
Pin 22	Pin 2	GND_+/- 12 V (sau +/- 15 V)
Pin 1	Pin 3	- 12 V (sau - 15 V)
Pin 3	Pin 4	+ 5 V
Pin 15	Pin 5	GND_+/- 5 V
Pin 4	Pin 6	- 5 V
Pin 12	Pin 7	Ieşire digitală Ch. 0
Pin 11	Pin 8	Ieşire digitală Ch. 1
Pin 10	Pin 9	Ieşire digitală Ch. 2
Pin 20	Pin 10	Ieşire digitală Ch. 3
Pin 19	Pin 11	Ieşire digitală Ch. 4
Pin 21	Pin 12	GND_Digital
Pin 25	Pin 13	Ieşire analogică
Pin 13	Pin 14	Intrare numărător, 32 biți
Pin 14	Pin 15	Intrare digitală Ch. 0
Pin 16	Pin 16	Intrare analogică Ch. 4, 10 biți
Pin 17	Pin 17	Intrare analogică Ch. 3, 24 biți
Pin 6	Pin 18	Intrare analogică Ch. 2 (-)
Pin 7	Pin 19	Intrare analogică Ch. 2 (+)
Pin 5	Pin 20	GND_ADC
Pin 8	Pin 21	Intrare analogică Ch. 1 (-)
Pin 9	Pin 22	Intrare analogică Ch. (+)
Pin 23	Pin 23	GND_ADC
Pin 18	Pin 24	Intrare analogică Ch. 0 (-)
Pin 26	Pin 25	Intrare analogică Ch. 0 (+)
Pin 24	N/C	GND +/- 5 V (NC)



Figura 6 *(a) Sursa de tensiune continuă pentru alimentare senzor și (b) sursa de înaltă tensiune pentru stimularea probelor*

3.2 Descrierea metodei de măsurare

Probele trebuie tăiate în formă circulară şi plasate între doi electrozi circulari din cupru, un electrod inferior cu diametrul de 23,5 mm şi grosimea de 1,4 mm şi un electrod superior cu diametrul de 18 mm şi grosimea de 0,34 mm. Diametrul probei trebuie să fie egal cu cel al electrodului inferior, zona activă fiind delimitată de aria electrodului superior. Apoi, senzorul trebuie adus în apropierea centrului electrodului superior, la o distanță de aproximativ 1 mm, reprezentând offset-ul senzorului. Pentru că senzorul de deplasare nu este ecranat, el este sensibil la perturbații externe, cum sunt vibrațiile şi câmpurile electromagnetice, şi din acest motiv ansamblul senzor-probă trebuie închis într-o cuşcă Faraday şi aşezat pe un bloc de bazalt cu tampoane de cauciuc (Figura 1). Presiunea de compresiune exercitată de greutatea electrodului superior, care are o greutate de 0,6667 g, asupra probei de elastomer este: $p_0=F/S=F/\pi R^2=(6{,}667\times10^{-3})/(3{,}14\times9^2)\ N/mm^2=0{,}0262$ MPa, unde F este forța de compresiune dată de greutatea electrodului, S este aria electrodului iar R este raza lui. Forța de compresiune este comparabilă cu forța raportată de Zyłka şi Janus (2010), exercitată de pinul unui microdilatometru cu senzor MEMS asupra unei membrane acrilice. Pentru că presiunea de compresiune exercitată de electrodul superior este mult mai mică decât modulul Young al probelor de PDMS-SiO_2-TiO_2, aceasta poate fi neglijată, având în vedere că asupra elastomerilor dielectrici se aplică de obicei tensiuni de compresiune mult mai mari, atunci când sunt puternic predeformați, sau când modul de fixare al probei sau electrozii limitează deplasările libere ale elastomerilor activați la tensiuni înalte.

Odată ce proba este așezată între electrozi și senzorul este adus în apropierea electrodului superior, urmează stimularea cu tensiune electrică continuă. Aplicarea unei tensiuni electrice înalte între cei doi electrozi, va duce la apariția fenomenului de electrostricțiune manifestat printr-o deformație electrică, adică prin contracția probei. Efortul Maxwell, principalul responsabil de deformațiile mari în actuatorii cu elastomer dielectric este mai puțin prezent în acest caz, deoarec electrozii sunt rigizi și nu complianți, pentru a se deforma odată cu proba de elastomer. Pentru a reduce efectul electrozilor rigizi

asupra deformației probei, și anume, forțele de frecare de la interfața electrod-elastomer care pot restricționa deformația, se va aplica un strat de lubrifiant (ulei – squalen). Uleiul aplicat între electrozi și probă poate reduce de până la 10 ori coeficientul de frecare, menținând filmul cât mai plan şi eliminând eventualele bule de aer pătrunse între electrod şi probă. Totuşi, faptul că suprafața filmului nu poate fi perfect plană iar grosimea nu este nici ea perfect uniformă, se poate spune că există o oarecare eroare de măsurare.

Deplasarea pe verticală a electrodului superior, în urma contracției probei, este sesizată de senzor, transmisă ca semnal prin placa de achiziție către calculator, şi apoi înregistrată. Oprirea stimulării probei se realizează prin scurtcircuitarea electrozilor (electrodul negativ fiind conectat la masă), filmul revenind la poziția inițială. Timpii de activare şi dezactivare sunt de aproximativ 2 minute fiecare, iar măsurările se vor realiza la temperatura camerei. Tensiunea electrică continuă aplicată electrozilor va varia de la 0 la maxim 6 kV, cu pasul de 100 V în intervalul 0÷1 kV şi cu pasul de 500 V în intervalul 1÷6 kV.

3.3 Obținerea rezultatelor experimentale

Semnalele rezultate în urma deplasării electrodului superior față de senzor pot fi stocate în calculator prin intermediul soft-ului Senzor2USB. Interfața acestui soft este destul de simplă, în partea de sus regăsindu-se o bară de meniuri. Meniul "Settings" (Figura 7) permite vizualizarea modelului plăcii de achiziție, firmware-ul şi tensiunea de alimentare primită de la USB. Sub denumirea plăcii se găsesc cele 5 canale, plus canalul pentru intrarea/ieşirea digitală şi canalul pentru ieşirea analogică. Senzorul de deplasare folosit la măsurători poate fi plasat pe canalul 3 (CH3 – Single Ended Input), selectându-se scara semnalului (±10 V) şi rezoluția de achiziție (21 biți, 4 semnale/secundă). Definirea caracteristicilor senzorului, cum ar fi domeniul de măsurare, sensibilitatea, tensiunea de excitare și offset-ul, se realizează apăsând butonul „Calibration".

Fereastra de meniu "RealTime" permite vizualizarea în timp real a semnalului, chiar şi pentru mai multe canale simultan. Figura 8 ilustrează un exemplu de semnal vizualizat în timp real, care arată activarea şi dezactivarea filmelor de elastomer supuse la tensiune electrică continuă. Meniul „Recording" permite înregistrarea și stocarea semnalelor în calculator (Figura 8).

Fişierele de semnal stocate au extensia *.dyn* şi se pot vizualiza şi analiza cu meniul „Viewer" (Figura 9). În acest meniu se poate realiza o analiză primară a semnalului, urmând apoi a fi exportat în format *.csv*, şi deschis cu programe de baze de date şi/sau lucru tabelar (de exemplu Excel). Semnalul *.csv* deschis cu Excel se prezintă sub forma unei coloane cu valorile tensiunii electrice de la ieşirea modulului ECPD. Folosind relația dintre deplasare şi tensiune, se pot calcula deformațiile în grosime pentru fiecare valoare a tensiunii electrice aplicate pe electrozi.

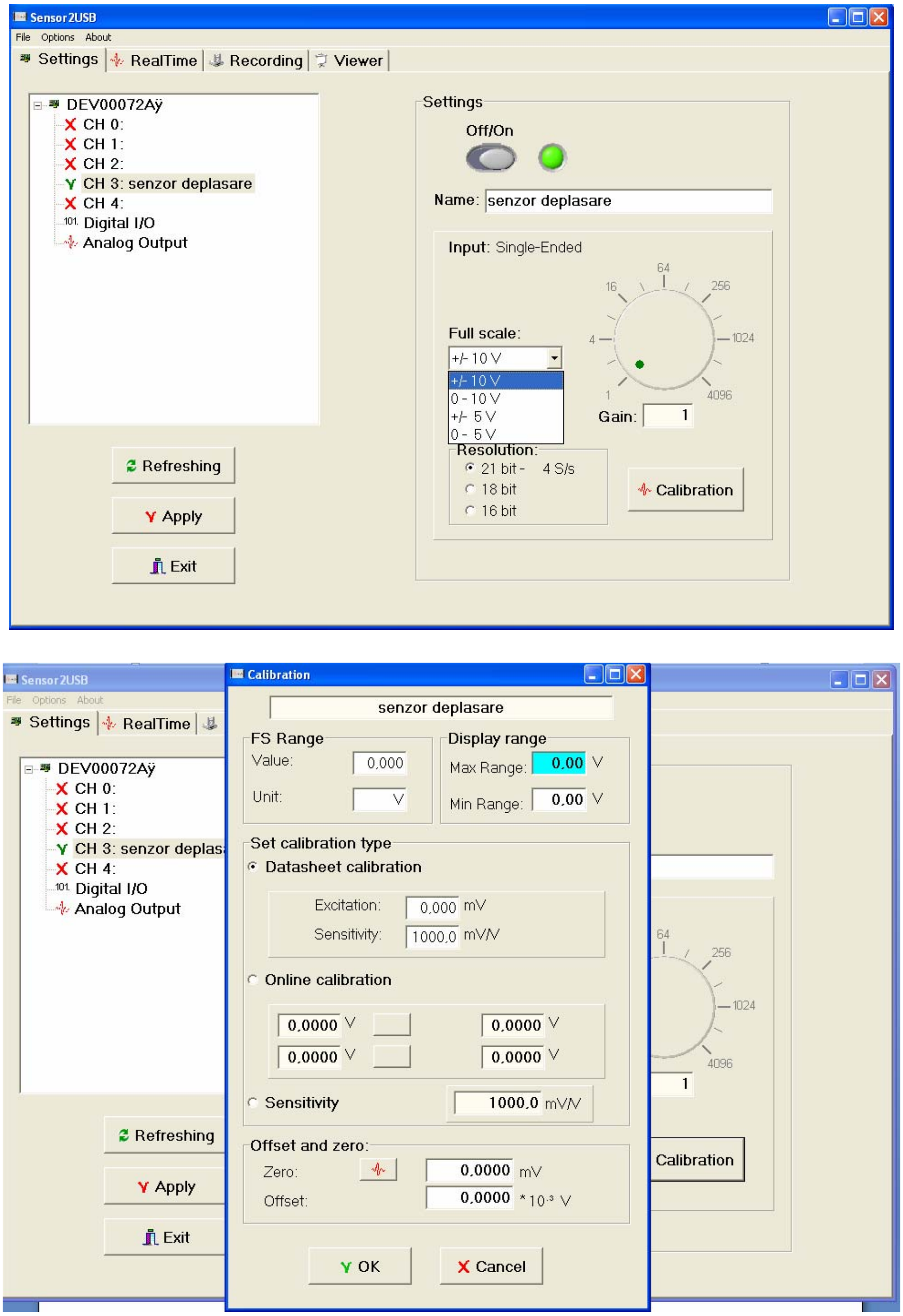


Figura 7 *Meniul "Settings"*

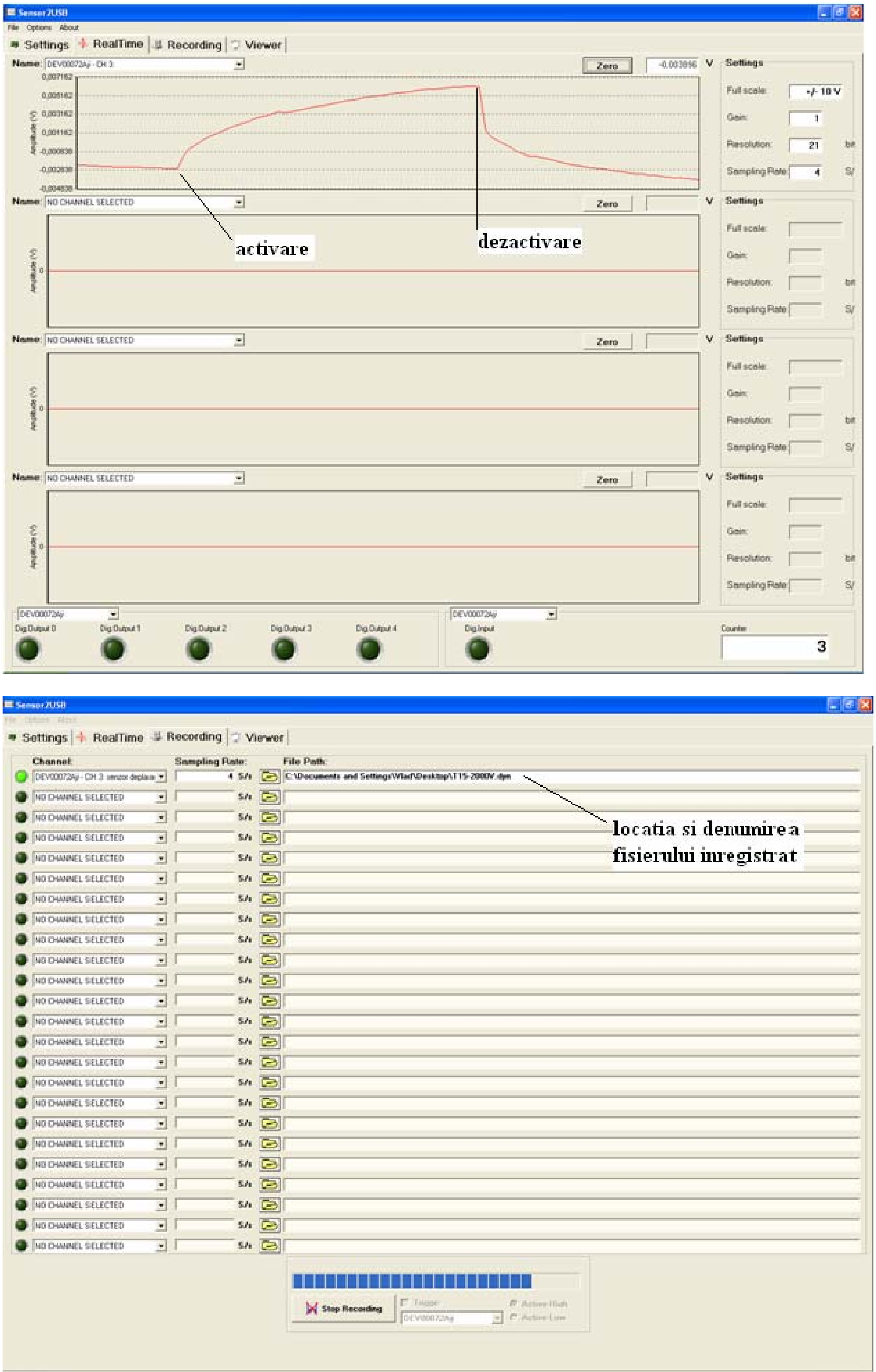


Figura 8 *Vizualizarea semnalului în timp real (stânga) și înregistrarea lui (dreapta)*

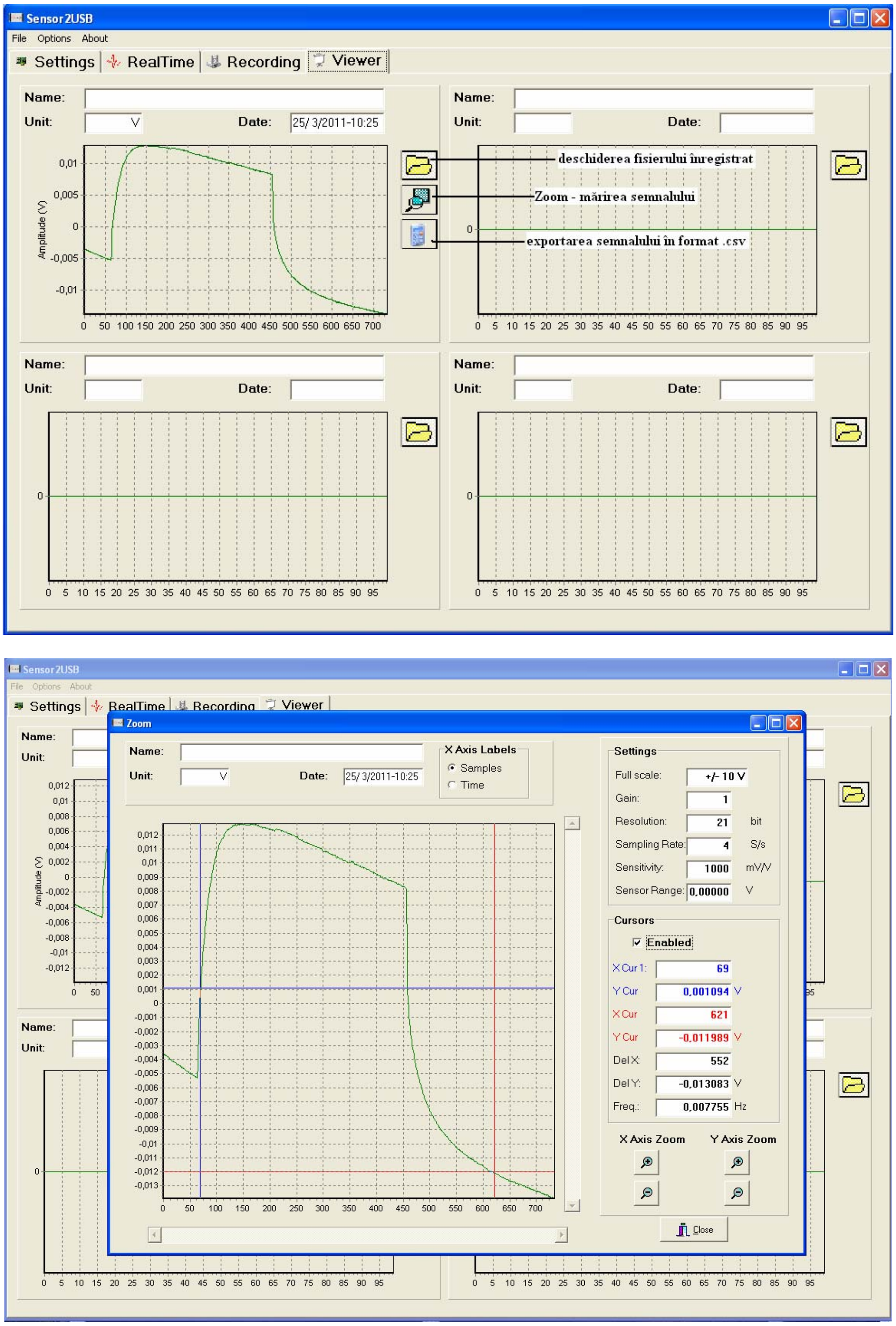


Figura 9 *Meniul „Viewer” pentru vizualizarea şi exportarea semnalelor*

Pentru reprezentarea grafică a dependenței deformației cu tensiunea electrică se utilizează programul Matlab. Aceste grafice pun în evidență dependența pătratică dintre deformație şi câmpul electric, specifică efectului electrostrictiv şi Maxwell, care stau la baza funcționării actuatorilor cu elastomer dielectric.

Figura 10(a) ilustrează răspunsul contracție-relaxare în timp la diferite tensiuni electrice continue de stimulare, iar figura 10(b) prezintă contracția (s_z) în funcție de timp pentru mai multe probe la tensiunea de 5000 V. Se pot observa trei regiuni distincte:

- porțiunea de început, de aproximativ 10 secunde, reprezentând înregistrarea în gol, fără tensiune electrică aplicată între electrozi. Liniarizarea acestei porțiuni, raportată la rezoluția de înregistrare (4 semnale/secundă) şi la întreg semnalul, reprezintă o prelucrare globală a răspunsului prin care poate fi redusă eroarea de măsurare datorată zgomotelor provenite de la diverse surse exterioare perturbatoare care se pot suprapune peste semnal, sau efectelor de membrană.
- porțiunea de activare, reprezentând o creştere rapidă, aproape instantanee la o anumită valoare a contracției, urmată de o stabilizare a ei;
- porțiunea de dezactivare, ca urmare a scurtcircuitării electrozilor, care se caracterizează printr-o revenire mai lentă la starea inițială, la tensiuni electrice mari existând deformații remanente mai semnificative.

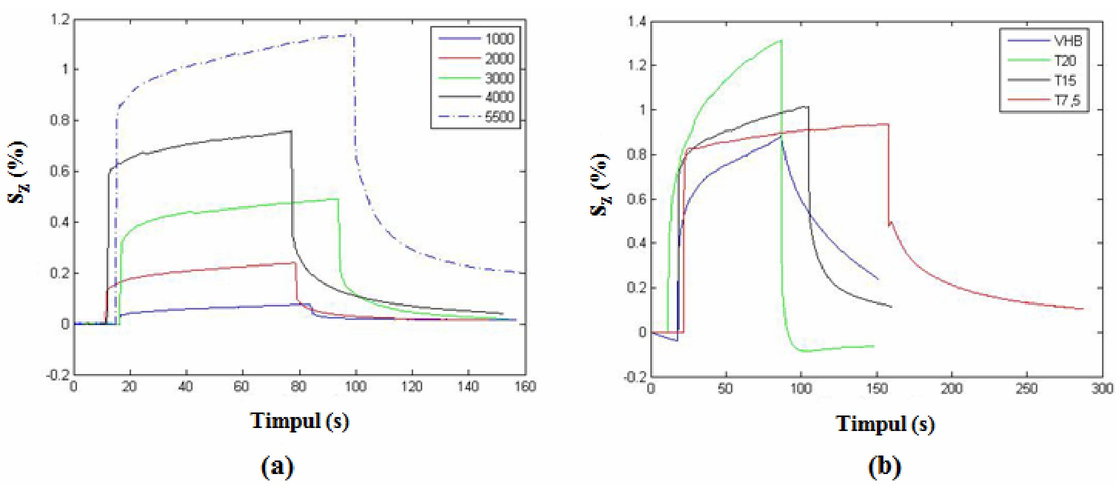


Figura 10 *(a) Contracția în timp a probei T15, în regim static; (b) contracția în timp la tensiunea de 5000 V, pentru diferite probe*

În figura 10(b) se poate observa şi semnalul contracție/relaxare în timp pentru elastomerul acrilic VHB 4905. Datorită efectelor vâscoelastice mai pronunțate din elastomerii acrilici, timpul de relaxare este mult mai mare, fapt pentru care revenirea la forma inițială se face mai lent față de elastomerii siliconici. Faptul că efectele vâscoelastice sunt mai puțin pronunțate în elastomerii siliconici, îi face pe aceştia să fie mai promițători ca elemente de actuație.

Dependența pătratică a contracției în grosime cu câmpul electric este ilustrată în figura 11(a). Deformația maximă de 1,3% a fost obținută pentru proba T20 la un câmp electric de 6 V/µm. Din panta porțiunii inițiale liniare a curbelor contracție-pătratul câmpului electric (Figura 11(b)) au fost calculați coeficienții electrostrictivi aparenți, conform relației (1).

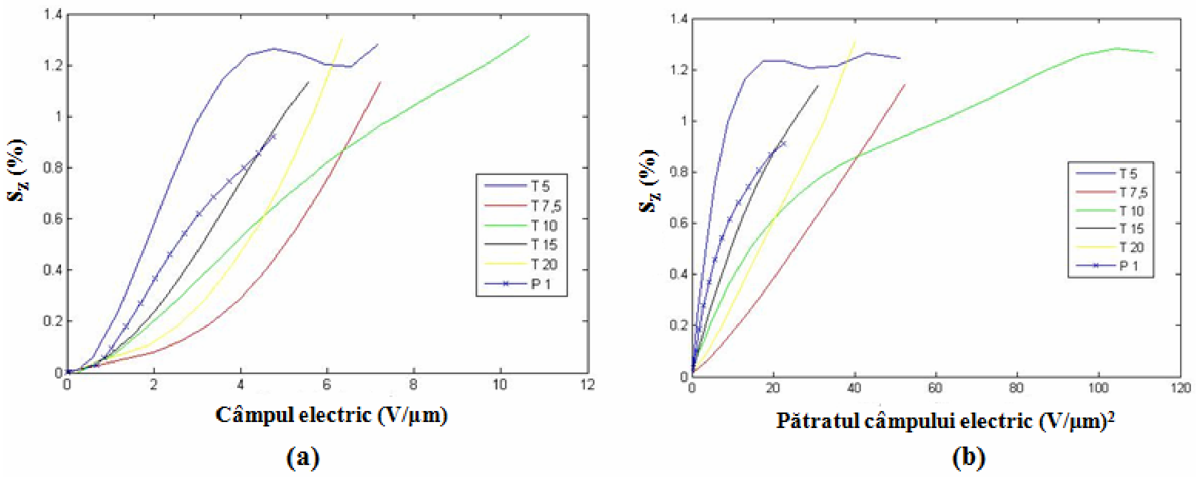


Figura 11 *Răspunsul electromecanic al elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2 în regim static*

$$S_E = -Q\varepsilon_0^2(\varepsilon_r - 1)^2E^2 \qquad (2.2)$$

Tabelul 3 prezintă, ca exemplu, parametrii electromecanici ai elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2, calculați la un câmp electric de 6 V/μm.

Tabelul 3 *Parametrii electromecanici ai elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2*

Probă	Y [MPa]	ε' [1 kHz]	S [%]	$M\cdot10^{-16}$ [m^2/V^2]	P [MPa]	S_M/S [%]	$e_m\cdot10^3$ [J/cm^3]
T5	0,638	3,65	1,1	13,2	0,007	$2{,}1\cdot10^{-4}$	0,038
T7.5	0,484	3,73	1,13	2,1	0,0054	$18{,}3\cdot10^{-4}$	0,03
T10	0,624	3,65	1,18	4,3	0,0073	$7{,}1\cdot10^{-4}$	0,043
T15	0,643	3,8	1,3	5,2	0,0083	$6{,}53\cdot10^{-4}$	0,054
T20	0,817	4,1	1,4	3,2	0,011	$9{,}71\cdot10^{-4}$	0,08
P1	1,487	3,46	0,9	9,6	0,013	$0.96\cdot10^{-4}$	0,06

3.5. Comentarii privind rezultatele experimentale

Valorile parametrilor electromecanici din tabelul 3 sunt relativ scăzute, din cauza mai multor factori. Un impact major asupra performanței de actuație îl au electrozii metalici, care nu pot exploata la maxim efortul Maxwell, adică nu se destind odată cu proba. Un alt factor cu un impact negativ este grosimea prea mare a filmelor, de până la 10 ori, față de grosimea altor elastomeri din literatură (care poate ajunge la câțiva zeci de micro) folosiți în experimente de actuație. Cu toate acestea, reiese că din punct de vedere al proprietăților dielectrice şi mecanice, elastomerii PDMS-SiO_2-TiO_2 sunt comparabili cu alți elastomeri utilizați în literatură ca actuatori sau senzori. Prin urmare, creşterea performanței de actuație a acestor materiale rebuie să aibă în vedere în primul rând utilizarea unor electrozi complianți (ca de exemplu ioni de Au implantați sau paste

conductoare) care să nu restricţioneze deformaţia, grosimea filmelor trebuie redusă mult, la câţiva zeci de µm, iar constanta dielectrică ar mai trebui crescută prin adăugarea unei concentraţii mai mari de titania, sau chia a unui alt aditiv. Figura 12(a şi b) ilustrează influența conţinutului de silica şi titania dar și a constantei dielectrice asupra contracției în grosime (s_z) a elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2. Tot din tabelul 3 se mai poate observa că presiunea de actuaţie, contribuţia efortului Maxwell şi densitatea de energie mecanică cresc odată cu creşterea conţinutului de titania.

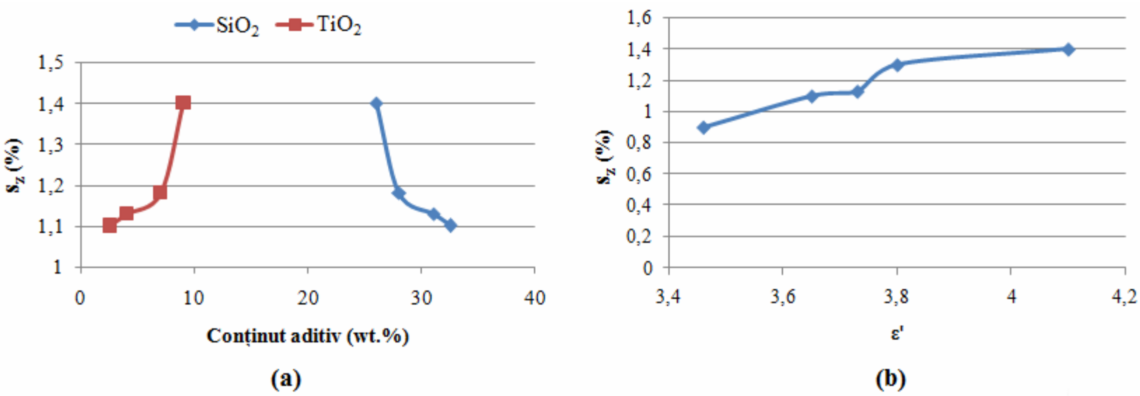


Figura 12 *Dependența contracției cu: (a) conținutul de SiO_2 și TiO_2; (b) constanta dielectrică*

Contracţiile în grosime ale elastomerilor PDMS-SiO_2-TiO_2 măsurate în regim static cu electrozi metalici rigizi, sunt destul de mici, însă, sunt comparabile ca ordin de mărime cu cele obținute de alţi cercetători pe diverşi elastomeri dielectrici folosiţi ca actuatori

4. Modul de lucru

- se va lua cunoştinţă despre polimerii electroactivi;
- vor fi identificate elementele echipamentului şi se vor reține caracteristicile lor tehnice şi rolul lor în determinările experimentale;
- se va însuşi metoda de lucru;
- se va lucra efectiv pe echipament pentru a putea fi începute încercările experimentale.

LUCRARE LABORATOR NR.2

Determinarea modelului matematic al contracției prin identificarea sistemului

1. **Scopul lucrarii:**

- realizarea de experimente pe probe de polimeri electroactivi;
- determinarea modelului matematic al contracţiei datorate excitării într+n câmp electric prin identificarea sistemului.

2. Conceptul de identificare a sistemelor

Conceptul de identificare a sistemelor face parte din câmpul modelării sistemelor mecanice utilizând date obținute pe cale experimentală. Conceptul de sistem este prezentat în figura 1 şi constă din semnalul de intrare u(t), perturbaţii v(t) şi răspunsul y(t). În mod general, utilizatorul poate interveni doar asupra semnalului de intrare, în vederea obținerii unui răspuns adecvat, însă perturbațiile v(t) care intervin sunt greu de modelat sau estimat, acestea alterează în mod semnificativ răspunsul. Semnalele de ieşire sunt variabile care descriu şi furnizează informații cu privire la comportamentul sistemului.

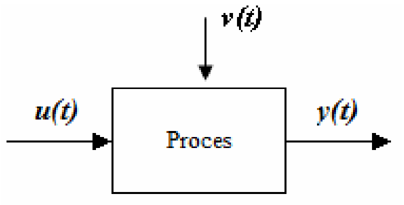


Figura 1 *Conceptul de sistem*

Prin caracteristica statică a unui proces se înțelege dependența între mărimea de ieşire şi mărimea de intrare în regim staționar. Caracteristica dinamică a unui sistem sau a unui proces exprimă variația mărimilor de intrare şi de ieşire în timp. Dacă la intrarea procesului se aplică un semnal treaptă unitate, la ieşire se obține ca răspuns dinamic al procesului, un răspuns indicial (Figura 2).

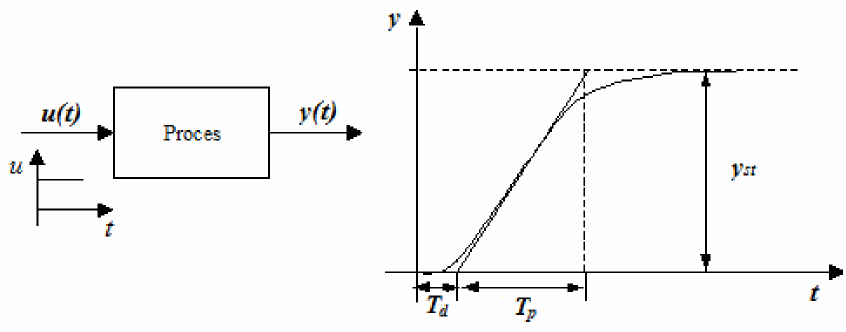


__Figura 2__ Răspunsul indicial al unui proces

Pe caracteristica dinamică se va trasa o tangentă la curba obținută experimental şi se vor determina aproximativ parametrii procesului K_p, T_p și T_d, conform relației:

$$K_p = \frac{\Delta y_{st}}{\Delta u} \quad (1)$$

unde Δu reprezintă saltul de comandă, K_p este factorul de proporționalitate, T_p este constanta de timp iar T_d este timpul mort (întârzierea intrare-ieşire).

Prin identificarea unui proces se ințelege determinarea caracteristiciilor statice şi dinamice ale sistemului, precum şi exprimarea lor sub forma unui model matematic. Problema identificării unui proces se poate pune în două moduri:

- identificarea (evaluarea) parametrilor (coeficienților) în cazul în care se cunoaşte expresia analitică a modelului matematic;
- identificarea globală, în cazul în care cunoştințele referitoare la comportarea procesului nu permit o reprezentare matematică principială.

Modelele obținute în urma procesului de identificare a sistemelor au următoarele particularități în comparație cu cele pe bază de ecuații matematice sau procese fizicochimice:

- sunt foarte uşor de generat şi utilizat;
- au validitate limitată (sunt valide doar în anumite condiții de lucru sau pentru anumite procese);
- nu oferă o vedere în interiorul procesului fizic, din moment ce parametrii modelului nu au semnificație fizică, aceştia fiind utilizați doar pentru a descrie cu o acuratețe cât mai mare comportamentul sistemului modelat.

Procesul de identificare se realizează prin excitarea sistemului cu un semnal treaptă, sinusoidal sau aleatoriu şi observarea răspunsului acestuia pe o perioadă determinată de timp. Prin intermediul unor echipamente corespunzătoare, semnalele sunt preluate şi stocate în calculator pentru o prelucrare ulterioară a informației. Demersul are ca scop generarea unui model care să fie în acord cu datele preluate din proces, model materializat sub forma unei funcții de transfer intrare-ieşire. Un exemplu de funcție de transfer cu un singur pol are forma:

$$G(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1} \cdot e^{-T_d s} \quad (2)$$

3. Descrierea metodei de identificare a sistemului

Metoda de identificare a comportamentului dinamic a sistemelor de acționare pe bază de elastomeri dielectrici are ca suport placa de achiziție microBox de la Disynet, care

preia semnalul analogic de la senzorul de deplasare EP080. Placa microBox este o placă de control în timp real, care permite interfaţarea procesului prin porturi intrare/ieşire analogice şi digitale.

După prelevarea datelor experimentale, în mediul Matlab se apelează funcţia „Ident” care deschide interfaţa „System Identification Tool” (Figura 3). Această interfaţă pune la dispoziţie o gamă largă de metode de identificare a procesului, atât liniare cât şi neliniare. Deoarece semnalele înregistrate cu senzorul sunt semnale în timp, se alege opţiunea „Time Domain Data” unde pot fi importate variabilele de intrare şi ieşire dar şi alte informaţii, cum ar fi rata de eşantionare a semnalului. S-a ales o rată de eşantionare de 0,25, în concordanţă cu rezoluţia de 21 de biţi (4 semnale/secundă) a senzorului.

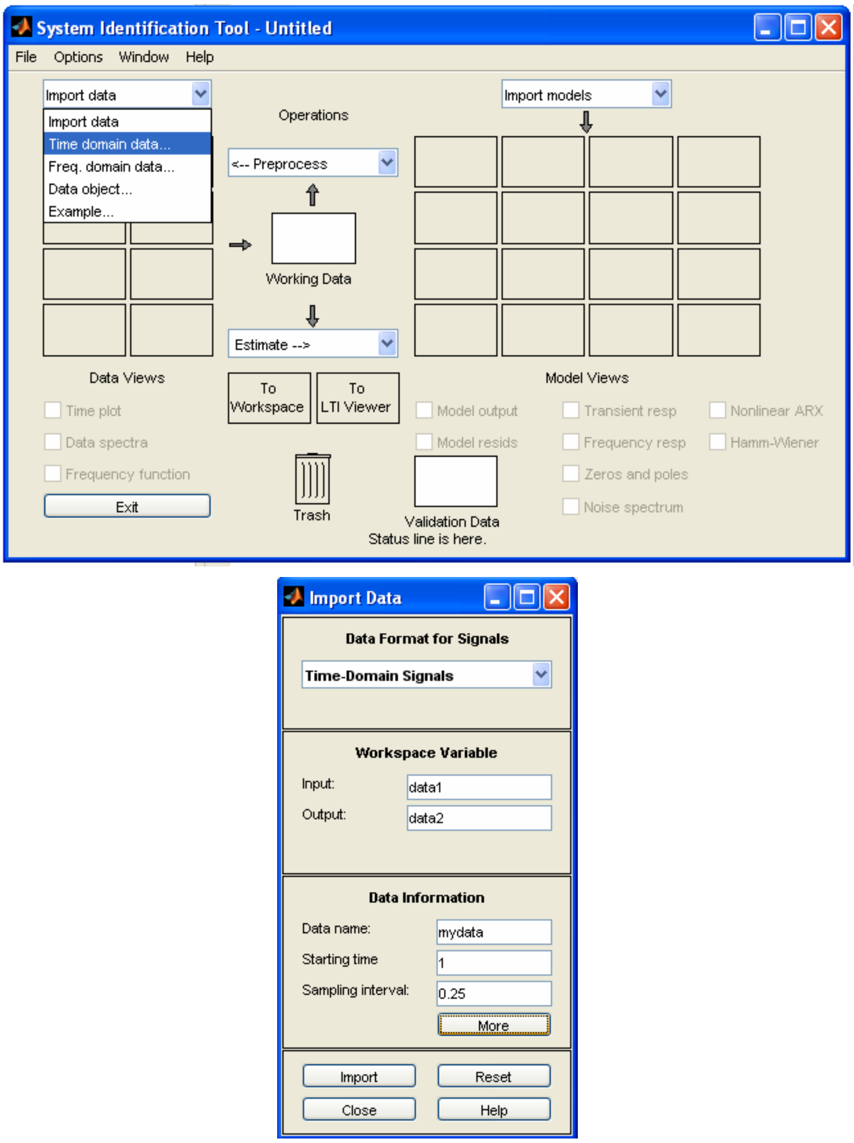
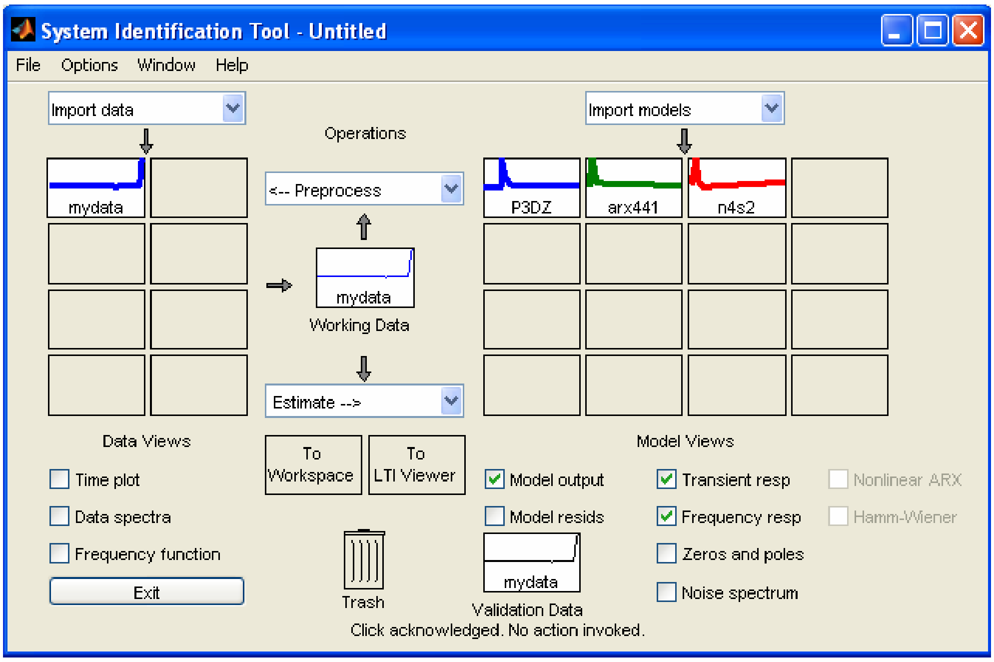


Figura 3 *Interfaţa „System Identification Tool” pentru identificarea sistemului*

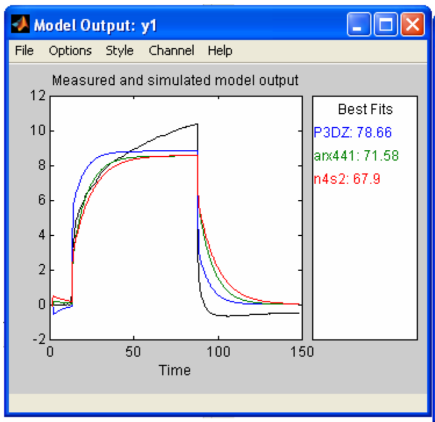
După alegerea seturilor de date pentru generarea modelului, acestea pot fi preprocesate sau estimate, alegând numărul de parametri pentru funcţia de transfer G(s)

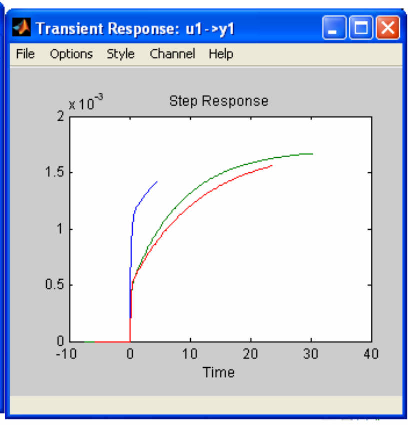
care descrie comportamentul sistemului, printre care şi numărul de poli şi zerouri ai funcţiei şi natura acestora (reali sau complecşi). Selectarea opţiunii „Quick start" duce la determinarea a trei modele de răspuns optime din punct de vedere al gradului de asemănare cu răspunsul sistemului.

În cadrul metodologiei de identificare a procesului, pentru fiecare probă în parte pot fi identificate trei funcţii de transfer (Figura 4(a)), P3DZ, arx441 şi n4s2, diferenţa dintre ele fiind dată de forma acestora. Funcţia de transfer P3DZ a modelului procesului a fost obţinută prin opţiunea „Process Models", pe când celelalte două funcţii au fost obţinute cu comanda „Linear parametric models". Răspunsurile celor trei funcţii de transfer sunt prezentate în figura 4(b) în comparaţie cu răspunsul înregistrat experimental, din care se poate observa procentul de asemănare cu răspunsul real pentru fiecare funcţie în parte. Figurile 4(c) şi (d) reprezintă forma părţii de început a răspunsului la semnal treaptă, respectiv răspunsul în frecvenţă, al modelelor descrise de cele trei funcţii de transfer.

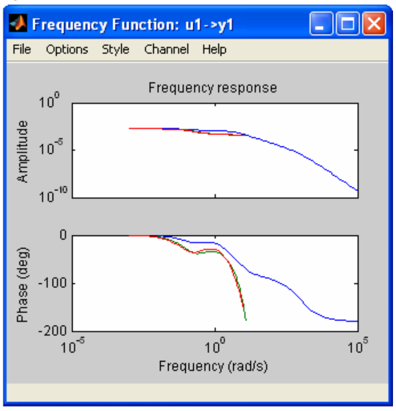


(a)





(b) (c)



(d)

Figura 4 *Identificarea procesului cu trei funcții de transfer pentru proba T20*

Modelul procesului care aproximează răspunsul experimental al probei T20 la tensiunea electrică de 5000 V este descris de o funcție de transfer cu 3 poli şi un zero şi un procent de asemănare de 78,66%. Funcția P3DZ are forma:

$$G(s) = K_p \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)(1 + T_{p3} s)} \exp(-T_d s) \qquad (3)$$

unde K_p=0,0017614, T_{p1}=6,9155, T_{p2}=0,21855, T_{p3}=0,001, T_z=4,3592, T_d=0; loss function=0,967014 şi FPE=0,986549.

Funcția arx441 generează un model de tip IDPOLY discret în timp cu un procent de asemănare de 71,58%, având forma:

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t) \qquad (4)$$

unde $A(q)=1-1{,}079\ q^{-1}+0{,}02266\ q^{-2}+0{,}05305\ q^{-3}+0{,}02585\ q^{-4}$, $B(q)=0{,}0004174\ q^{-1}-0{,}0003902\ q^{-2}+5{,}389\cdot 10^{-6}\ q^{-3}+5{,}585\cdot 10^{-6}\ q^{-4}$, loss function=0,0457931 şi FPE=0,0470265. Modelul IDPOLY discret a fost transformat într-un model IDPOLY continuu în timp de forma:

$$A(s)y(t)=B(s)u(t)+C(s)e(t) \qquad (5)$$

unde $A(s)=s^4+14,62\ s^3+154,5\ s^2+402\ s+44,43$, $B(s)=0,002458\ s^3+0,03934\ s^2+0,2027\ s+0,07587$, $C(s)=s^4+18,87\ s^3+216,6\ s^2+1060\ s+1990$, loss function=0,0457931 şi FPE=0,0470265.

Funcţia n4s2 generează modelul spaţial de stare cu o intrare, o ieşire, două stări şi 12 parametri liberi. Are un procent de asemănare de 67,9%, loss function=0,0468443 şi FPE=0,0481061.

Pentru exemplificare sunt date funcţiile de transfer şi coeficienţii modelelor care descriu procesul pentru celelalte nişte probe studiate în regim static :

a) proba T15

- P3DZ (79,14%): K_p=0,00021537, T_{p1}=69,964, T_{p2}=4,005, T_{p3}=0,001, T_z=50,924, T_d=0; loss function=0,00677346 şi FPE=0,00690026;
- arx441 (85,65%): $A(q)=1-0,5076\ q^{-1}-0,2806\ q^{-2}-0,1963\ q^{-3}+0,004601\ q^{-4}$, $B(q)=9,94\cdot10^{-5}\ q^{-1}-4,591\cdot10^{-5}\ q^{-2}-2,947\cdot10^{-5}\ q^{-3}-2,001\cdot10^{-5}\ q^{-4}$, loss function=0,000240904 şi FPE=0,000246917;
- n4s2 (86,95%): loss function=0,000240931 şi FPE=0,000246945.

b) proba T10

- P2DZ (83,56%) cu 2 poli şi un zero: K_p=0,00040461, T_{p1}=219,05, T_{p2}=0,49426, T_z=86,12, T_d=0; loss function=0,00427707 şi FPE=0,00431682;
- arx441 (74,11%): $A(q)=1-0,6515\ q^{-1}-0,2421\ q^{-2}-0,1193\ q^{-3}+0,01629\ q^{-4}$, $B(q)=9,945\cdot10^{-5}\ q^{-1}-5,094\cdot10^{-5}\ q^{-2}-2,674\cdot10^{-5}\ q^{-3}-1,26\cdot10^{-5}\ q^{-4}$, loss function=0,000308718 şi FPE=0,000313308;
- n4s2 (74,62%): loss function=0,000311139 şi FPE=0,000315766.

c) Proba T7,5

- P2DZ (87,31%) cu 2 poli şi un zero: K_p=0,00021764, T_{p1}=102,35, T_{p2}=0,52912, T_z=63,254, T_d=0; loss function=0,00219307 şi FPE=0,00221214;
- arx441 (64,05%): $A(q)=1-1,175\ q^{-1}+0,3074\ q^{-2}-0,1742\ q^{-3}+0,04705\ q^{-4}$, $B(q)=3,56\cdot10^{-5}\ q^{-1}-2,948\cdot10^{-5}\ q^{-2}+7,871\cdot10^{-7}\ q^{-3}-5,937\cdot10^{-6}\ q^{-4}$, loss function=0,000225079 şi FPE=0,000228211;
- n4s2 (68,51%): loss function=0,0002361 şi FPE=0,000239454.

d) Proba T5

- P2DZ (77,28%) cu 2 poli şi un zero: K_p=0,00063385, T_{p1}=215,2, T_{p2}=1,3154, T_z=39,89, T_d=0; loss function=0,00585432 şi FPE=0,00595092;
- arx441 (46,8%): $A(q)=1-2,691\ q^{-1}+2,383\ q^{-2}-0,6861\ q^{-3}+0,005241\ q^{-4}$, $B(q)=-2,158\cdot10^{-5}\ q^{-1}+8,387\cdot10^{-6}\ q^{-2}-9,67\cdot10^{-6}\ q^{-3}+3,446\cdot10^{-6}\ q^{-4}$, loss function=0,000239663 şi FPE=0,000245991;
- n4s2 (42,14%): loss function=0,000253303 şi FPE=0,000259991.

e) Proba P1

- P2DZ (88,68%) cu 2 poli şi un zero: K_p=0,0012036, T_{p1}=1153,9, T_{p2}=0,3114, T_z=189,55, T_d=0; loss function=0,000912311 şi FPE=0,000921;

- arx441 (56,01%): $A(q)=1-0{,}8639\ q^{-1}-0{,}07221\ q^{-2}-0{,}0749\ q^{-3}+0{,}01334\ q^{-4}$, $B(q)=7{,}375\cdot10^{-5}\ q^{-1}-5{,}133\cdot10^{-5}\ q^{-2}-1{,}318\cdot10^{-5}\ q^{-3}-8{,}522\cdot10^{-6}\ q^{-4}$, loss function=0,000234891 şi FPE=0,000238511;
- n4s2 (56,65%): loss function=0,000236764 şi FPE=0,000240414.

Metodologia de identificare a procesului care descrie răspunsul elastomerilor în câmp electric este utilă pentru dezvoltarea de actuatori și senzori performanți. Găsirea modelului matematic care să descrie comportamentul static (semnal treaptă) și dinamic (semnal sinusoidal) al unor astfel de materiale este util în implementarea cu succes în tehnici de control bazate pe model. Acest lucru ușurează munca în cadrul proiectării integrate reprezentate de proiectarea componentei de control, utilizând tehnici de prototipare rapidă a controlului.

4. Modul de lucru

- se vor efectua măsurători experimentale pe probe de polimeri electroactivi;
- se va identifica modelul matematic care descrie răspunsul elastomerilor in câmp electric utilizând metodologia din lucrare;
- vor fi trasate graficele corespunzătoare.